

中国空间站的空间环境预报技术与展望

钟秋珍^{1,2} 罗冰显^{1,2} 苗娟¹ 刘舒蔚³ 王红飞⁴ 陈东¹ 崔延美¹ 林瑞淋¹
王晶晶¹ 王昕¹ 王晶¹

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(北京航天飞行控制中心 北京 100094)

4(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

摘要 我国空间站运行在 400km 左右、倾角约为 42° 的低地球轨道上，影响空间站的空间环境主要是辐射环境和大气环境，这些环境受太阳活动变化影响。中国科学院国家空间科学中心承担了空间站的空间环境预报保障任务，为空间站各项任务以及航天员出舱提供了空间环境预报服务。本文分析了近期太阳和太阳风预报、空间辐射环境预报和大气环境预报的最近进展以及未来的发展需求。

关键词：中国空间站，预报技术

Development and Prospects of Space Environment Forecasting Technology for China's Space Station

Zhong Qiuzhen^{1,2} Luo Bingxian^{1,2} Miao Juan¹ Liu Shushi³ Wang Hongfei⁴ Chen Dong¹
CuiYanmei¹ Lin Ruilin¹ Wang Jingjing¹ Wang Xin¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094)

4(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract China's space station operates in a low-Earth orbit at approximately 400 km altitude with an inclination of about 42°. The primary space environmental factors affecting the station are space radiation and atmospheric conditions, both of which are influenced by solar activity. The National Space Science Center (NSSC) of the Chinese Academy of Sciences (CAS) is responsible for providing space environment forecasting services to support the space station's operations, including mission execution and astronauts' extravehicular activities (EVAs). This paper reviews recent advances in solar and solar wind forecasting, space radiation environment and atmospheric environment predictions, while also discussing future development needs for space environment forecasting technologies.

Keywords: China Space Station, Space environment forecasting technology

0 引言

中国空间站（天宫空间站）是中国自主建造的第三代多舱段空间站。2021 年 4 月发射天和核心舱，2022 年 7 月和 10 月先后发射问天实验舱和梦天实验舱，11 月三舱“T”字基本构型在轨组装完成，中国空间站全面建成，转入应用与发展阶段。空间站长期运行在高度 400km 左右的轨道上，航天员在太空长期驻留，并在轨开展多项空间科学实（试）验。空

间站在轨运行期间，经历的空间辐射环境和热层大气环境是影响空间站任务的两个主要因素。中国科学院国家空间科学中心承担了空间站的空间环境预报保障任务，为空间站各项任务以及航天员出舱提供了空间环境预报服务。本文将分析空间站空间环境预报服务需求以及空间环境预报技术进展。

1 空间环境预报服务需求

我国空间站运行在 400km 左右、倾角约为 42° 的低地球轨道上，影响空间站的空间环境主要是辐射环境和大气环境。辐射环境会对在轨航天员产生辐射剂量效应，也会对在轨设备产生单粒子、总剂量、位移损伤等辐射效应，航天员的辐射剂量评估、出舱任务规划等需要及时准确的辐射环境预报。大气环境主要影响空间站的轨道运行，空间站轨道预测、轨道维持、空间碎片预警等都需要精准的轨道大气环境预报支持。空间站的辐射环境和大气环境都与太阳活动密切相关。

1.1 太阳和太阳风

太阳活动是近地空间环境扰动的源头，准确的空间站辐射环境和大气环境预报，首先需要对扰动的源头太阳活动开展预报研究，包括太阳活动水平中长期预报、太阳爆发活动预报和太阳风预报。

1.2 空间辐射环境

空间辐射是人类探索太空面临的重大挑战之一，空间站任务由于轨道高度和轨道倾角较低，受地球磁场和大气的保护，空间站轨道上的辐射风险总体来说低于月球、火星等深空辐射环境。但对空间站任务的航天员来说，在轨时间长达几个月甚至 1 年以上，累积的辐射剂量对航天员的影响是不容忽视的。

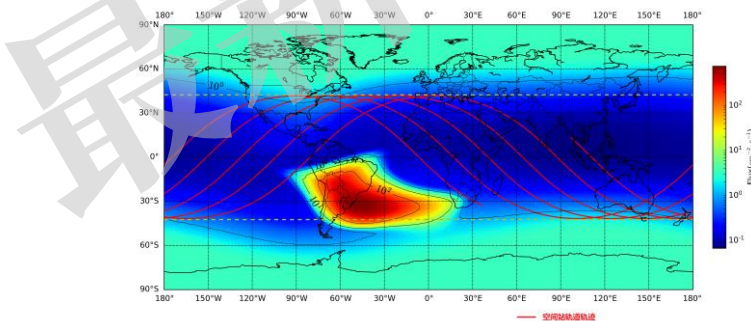


图 1 400km 轨道高度上大于 10MeV 高能质子分布(模型计算: AP9 辐射带+ISO 15390 银河宇宙线+ISO 17520-2016 地磁截止刚度)

Fig. 1 Distribution of high-energy protons (>10 MeV) at a 400 km altitude, calculated using the AP9 radiation belt model, ISO 15390 Galactic Cosmic Ray model, and ISO 17520-2016 geomagnetic cutoff rigidity standard

空间站轨道上包括四种不同来源的空间辐射，分别是南大西洋异常（SAA）区、外辐射带高能电子、银河宇宙线和太阳质子事件，其中稳定的辐射源主要是 SAA 和银河宇宙线。图 1 给出了无太阳质子事件时 400km 轨道高度上模型计算的高能质子 (>10MeV) 分布。南大西洋异常区是最主要的辐射环境，其成分主要是辐射带高能质子和高能电子，航天员长期的辐射剂量预估、短期的出舱任务窗口选择、在轨设备的辐射效应评估都需要准确的 SAA 预报，包括 SAA 的能谱预报、轮廓预报、进出 SAA 时间预报等。银河宇宙线是空间站轨道上的另一个稳定辐射源，由于我国空间站轨道倾角较低，受地磁场屏蔽的影响，银河宇宙线大部分被屏蔽，只有少部分能到达，主要分布在高纬度地区。外辐射带电子是一种扰

动的辐射源，由于我国空间站轨道倾角较低，外辐射带电子只有在强扰动时偶尔出现在空间站轨道的高纬度地区。太阳质子事件是一种偶发的太阳爆发活动，受地磁场的保护，普通的太阳质子事件对空间站轨道几乎没有影响，但在发生极端太阳质子事件并伴随大地磁暴的情况下，也会对空间站轨道的部分区域产生显著影响，尤其是出舱活动，需要准确预报太阳质子事件以及对空间站轨道辐射环境的影响。

1.3 大气环境

空间站轨道在 400km 高度左右，这个高度上热层大气会对航天器产生持续的拖曳效应，大气密度的不确定性是低轨卫星轨道预报误差的主要来源。对于空间站这种大型载人航天器，大气影响更为严重，尤其还需要多次变轨，以完成交会对接、返回等任务，因而对轨道预报提出了更高要求，如何进一步提高大气模型的预报精度仍是目前急需解决的一个问题。

2 空间站空间环境预报技术发展

2.1 太阳和太阳风预报

2.1.1 太阳爆发活动预报

太阳爆发活动预报主要是针对耀斑爆发的短期预报，以太阳活动区的磁特征为输入开展智能建模研究。Huang et al. (2018)^[1]以 SOHO/MDI 和 SDO/HMI 大量活动区光球磁图数据为输入，利用卷积神经网络 (CNN) 实现了耀斑先兆特征自动提取，训练了首个太阳耀斑预报的深度学习模型。为了挖掘活动区磁图中的耀斑预报参量，Wang et al. (2019a)；Wang et al. (2020a)^[2,3]使用无监督学习生成活动区极性反转线掩码，获取中性线附近新的耀斑先兆因子，新的先兆因子在用于预报强耀斑时明显优于传统的先兆因子。为了充分挖掘耀斑发生前磁场在空间和时间上的结构演化特征，何欣然 et al. (2022)^[4,5]利用过去 24 小时活动区的磁场变化时序构建样本，通过长短期记忆神经网络对磁场特征时序演化进行分析，预报未来 48 小时内是否发生 $\geq M$ 级别耀斑事件；Wang et al. (2023b)^[6]构建了活动区的磁图视频数据集，利用深度学习方法验证了活动区空时域特征在耀斑预测中的有效性。

在已有的太阳耀斑深度学习模型研究中，并没有充分考虑耀斑产生的先验知识，Li et al. (2022, 2023a)^[7,8]将耀斑先验知识用于数据处理和 CNN 模型构建，发展了融合先验知识的深度学习耀斑预报方法，建立了知识指导的复杂活动区深度耀斑预报模型。Deng et al. (2023)^[9]构建了两阶段耀斑预测框架 (HPF)，即先判断样本区域是否为耀斑活动区，再对耀斑活动区的样本进行耀斑预测，结果表明 HPF 的方法显著有效；Liu et al. (2023)^[10]建立了一种选择性上采样方法，创造出与真实情况非常接近的耀斑样本，从而提高耀斑预测性能。为了满足全日面耀斑业务预报的需求，李铭等 (2025, 2026)^[11,12]提出了一种面向全日面活动区的耀斑集合预报模型。该模型融合两类互补信息：一类是来自太阳光球磁场观测的活动区磁图；另一类是适用于全日面活动区的传统太阳活动参数，如活动区磁类型、10 厘米射电流量、耀斑指数等。模型最终可预报未来 48 h 内 $\geq M$ 级耀斑的爆发情况。Shao et al. (2025)^[13]以通义千问的 Qwen2VL-7B 多模态大模型为基座，将太阳磁图和特征参量作为输入进行大模型微调，研发了多模态金乌太阳 (JW-Flare) 大模型，该模型在太阳耀斑爆发预报任务中的预测准确率达到领域内先进水平。Wang et al. (2025)^[14]基于基础大模型框架，通过融合专家知识和多模态数据，构建了 AI 太阳活动预报员，实现了从多源观测数据输入到耀斑预报输出的全流程业务运行，其预报性能在多类评估指标上优于或接近人类预报员水平，展现出良好的业务应用潜力 (见图 2)。

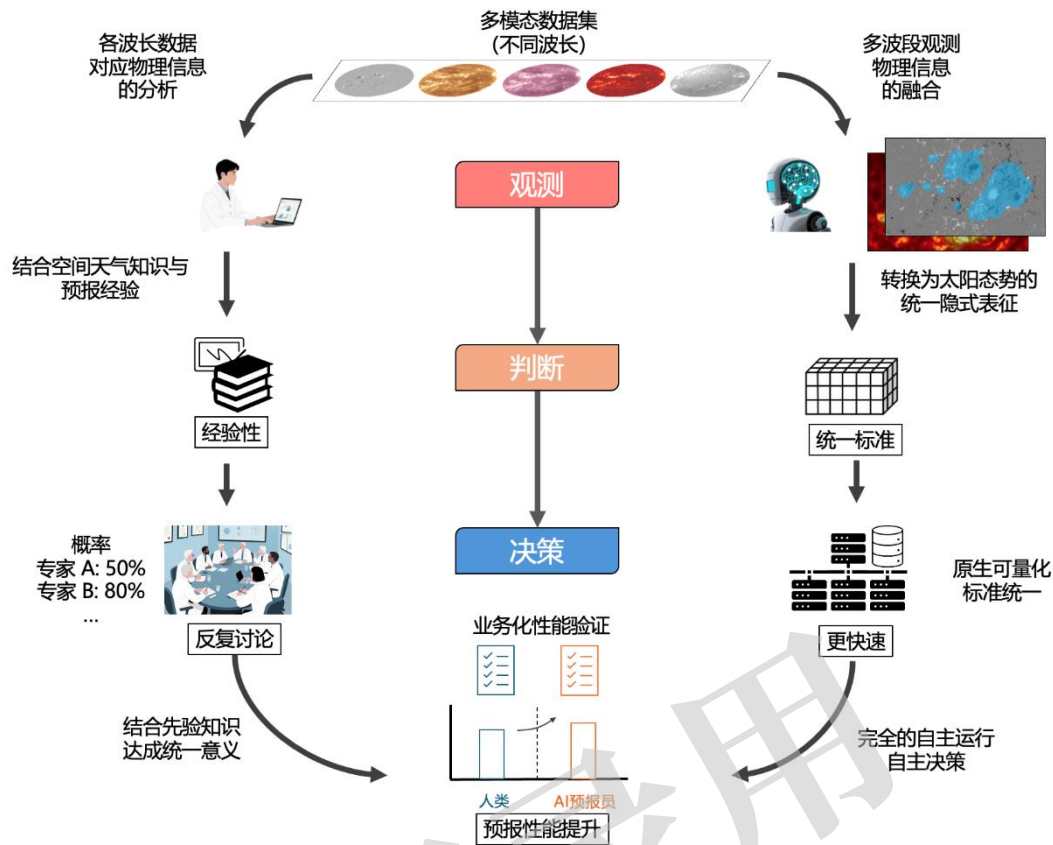


图 2 人工预报员预报流程与 AI 预报对比示意图 (Wang et al. (2025))^[14]

Fig. 2 Schematic comparison of forecasting workflows: human forecaster versus AI forecasting(Wang et al. (2025))^[14]

2.1.2 太阳风预报

太阳风预报主要为数值预报。太阳风预报模式[Wang et al., 2018a]^[15]采用了 PFSS 光球磁场外推模型、WSA 源表面太阳风速度经验模型提供内边界条件,使用了一个改进的 HAF 运动学模型,将太阳源表面处的磁场强度和太阳风粒子出发速度、以及日冕物质抛射的三维特征参数作为输入,代入行星际太阳风传播模型,进而模拟太阳风在 2AU 以内黄道面上的传播过程,可以预报近地球区域的行星际太阳风参数。在实际的业务预报中,源表面太阳风速度拟合公式并非一成不变,为了提升太阳风参数的预报准确率,该预报模式基于 2007 年至 2013 年的近地太阳风观测重新进行了拟合,重新拟合了源表面太阳风速度经验公式;并将太阳活动周期性变化对源表面太阳风密度的影响纳入考虑,采用了动态调整源表面太阳风密度初始输入值的方法,提升了对地球、火星上游背景太阳风参数的预报精度[Wang et al., 2023c]^[16]。当前,该模式将近地球区域的行星际太阳风预报能力拓展至更高纬度、更远日地距离的深空太阳风预报能力,可预报纬度 $\pm 60^\circ$ 范围内、日地距离 30 个太阳半径至 5AU 内的行星际太阳风参数(图 3)。

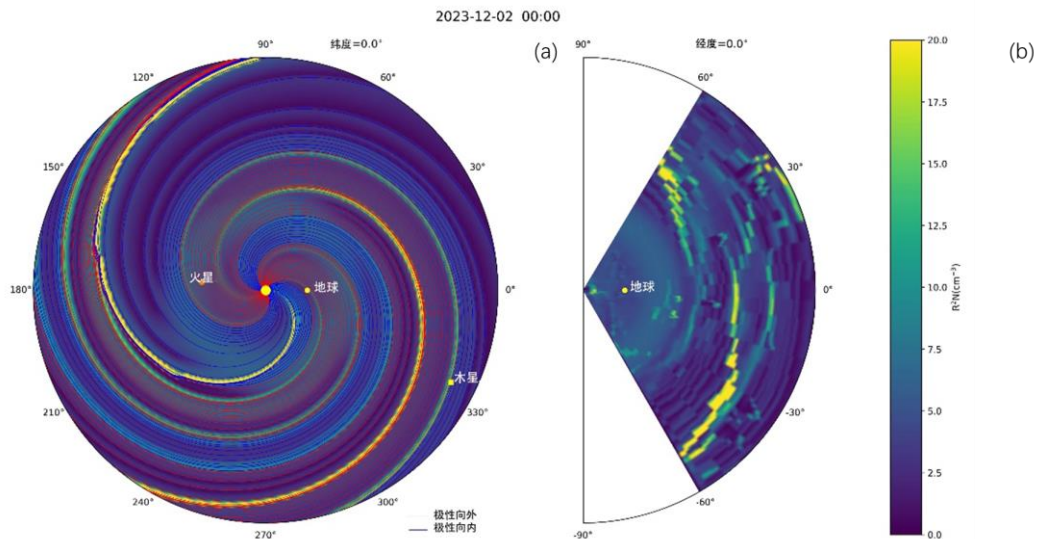


图 3 黄道面 5AU 以内 (a) 和沿地球所在经度剖面的太阳风参数预报产品 (b)

Fig.3 Solar-wind parameter forecast products for within 5 AU of the ecliptic plane (a) and the longitudinal slice along Earth's longitude (b)

2.2 空间辐射环境预报

2.2.1 太阳质子事件

太阳质子事件预报技术的发展主要体现在经验统计和数值预报研究两个方面。Zhong et al(2019)^[17] 研究分析了 1990 年 1 月至 2017 年 9 月期间 GOES 卫星获取的 5 分钟平均软 X 射线通量、质子微分通量及积分通量数据，开发了太阳质子事件预测模型及相关产品，可对未来 24 小时内是否会发生 SEP 事件进行预测。太阳高能粒子加速数值预报模式 [Du et al., 2022; 杜晨曦 et al., 2021]^[18,19] PODOSEPAT (prediction on demand of solar energetic particle acceleration and transport) 的运行框架如下图 (图 4 左图) 所示，太阳高能粒子的加速和传播计算过程主要由 iPATH 模型来完成。该模式以 1AU 处的平均太阳风参数和日冕仪观测到的日冕物质抛射 (CME) 爆发图像反演所得到的 CME 参数作为输入，给出地球空间环境的太阳高能质子的能谱和通量的预报，包括三种不同的粒子：质子、氧离子、 α 粒子 (图 4 右图)。

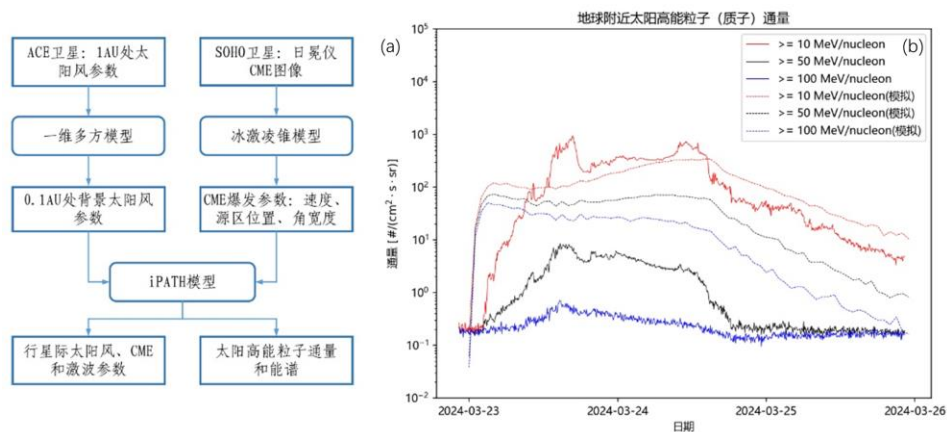


图 4 PODOSEPAT 模式: a 图为模式运行框架图, b 图为 2024 年 3 月 23 日 SEP 事件的模拟和 GOES 卫星观

PODOSEPAT model: panel (a) model operational framework; panel (b) comparison between simulations and GOES observations for the 23 March 2024 SEP event

此外, 针对中国空间站轨道, 钟秋珍等(2025)^[20]利用反向追迹方法和衰减系数计算了地磁扰动期间太阳高能粒子地磁截止刚度和截止能量的分布变化规律, 得到地磁扰动情况下的截止刚度大多小于地磁平静时的截止刚度; 磁暴期间, 全球截止刚度等值线向低纬度移动, 中低纬度地区的截止刚度变化不大, 中高纬度地区变化剧烈。制定了国家标准 GB/T 41206-2021/ISO 17520:2016《空间环境 自然和人工 宇宙线和太阳能量粒子穿入磁层有效垂直地磁截止刚度的确定方法》^[21]。

2.2.2 辐射带

针对内辐射带高能质子辐射强度预报, 常峥(2015)^[22]通过大量国内外低高度质子辐射带观测数据, 建立相应数据库, 较好实现了低高度质子辐射带辐射分布历史重构, 林瑞淋等(2019)通过研究质子辐射带辐射强度和 F10.7 之间的关系, 提出新的关系函数, 验证了低高度质子辐射带分布可预报性以及新模式函数预报效果^[23]。图 5 显示了新模式函数和 NOAA PRO 模式函数对低高度磁赤道面上 5 个位置 $>16\text{MeV}$ 质子全向积分通量拟合效果(实线)及预报效果(虚线), 其中黑线为实测结果, 图 5(a)和图 5(b)为新模式结果, 图 5(c)和图 5(d)为 NOAA PRO 模式函数结果。通过图 5(b)和图 5(d)比较可知, 新模式拟合和预报效果都明显提升。

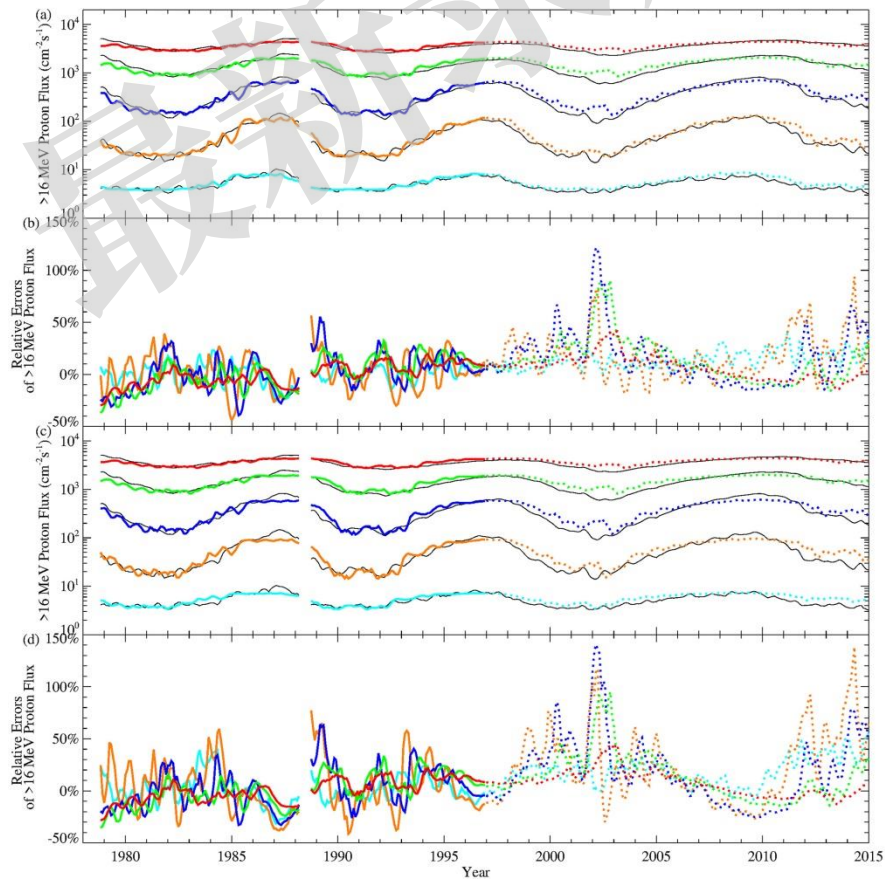


图 5 新模式函数和 NOAA PRO 模式函数对低高度磁赤道面上 5 个位置 $>16\text{MeV}$ 质子全向积分通量拟合效果

(实线)及预报效果(虚线)

Fig.5 Fitting performance (solid lines) and forecasting performance (dashed lines) of the new-model function and NOAAPRO model function for the omnidirectional integral flux of >16 MeV protons at five locations on the low-altitude magnetic equatorial plane

2.2.3 银河宇宙线

针对我国空间站及深空探测任务对银河宇宙线预报需求,中国科学院国家空间科学中心联合山东高等技术研究院,利用中国科学院国家空间科学中心提供的第 25 太阳活动周太阳黑子数、F10.7、行星际磁场、太阳风速度、日球层电流片倾角参数预报,以及山东高等技术研究院银河宇宙线 SDEMMA 数值模式^[24-26],实现了第 25 太阳活动周太阳系银河宇宙线预报,提供 90AU 以内 0.21GV 到 100GV 能量 H 到 Ni 银河宇宙线长周期预报。依据预报结果,设计了太阳系银河宇宙线预报、8 大行星处银河宇宙线能谱预报、8 大行星处银河宇宙线能谱时间序列预报、地球 400km 高度银河宇宙线预报等模块,并已集成到中国科学院国家空间科学中心空间环境预报中心新版网站中,如图 6 所示。

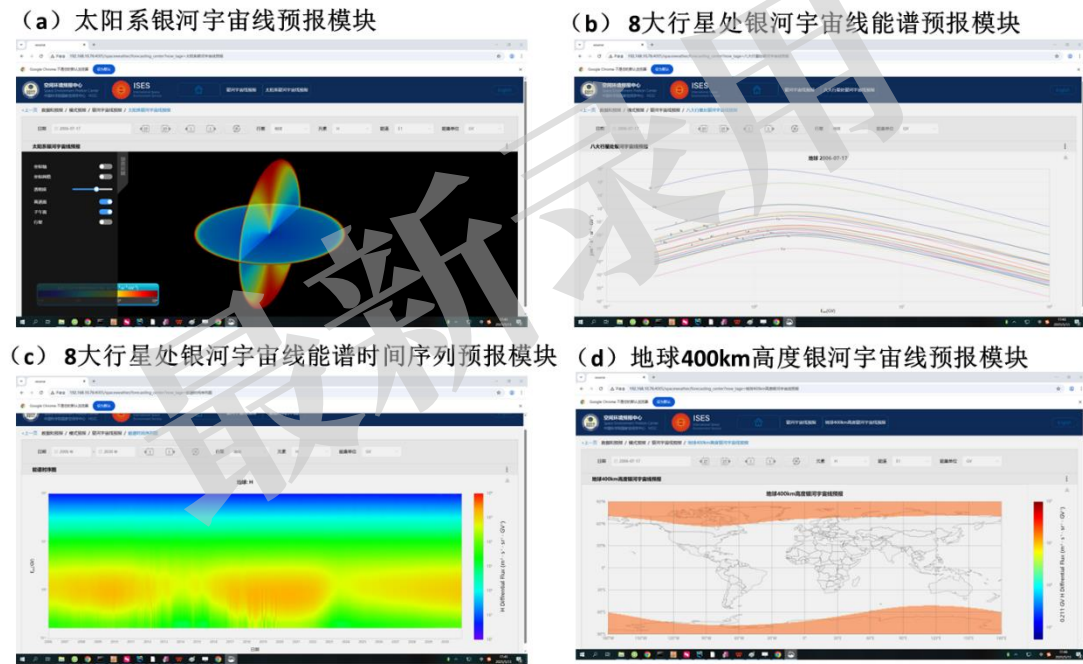


图 6 网页发布的太阳系银河宇宙线预报信息

Fig.6 Web-published solar-system galactic cosmic-ray forecast information

2.3 大气环境预报

2.3.1 大气密度预报

围绕提升空间站预报精度这一核心任务,持续开展大气密度的分析与研究,分别在大气密度机理研究、密度反演方法探究、模型修正的结果、空间站精密定轨和轨道预报技术等方面实现了一系列突破。

在地磁暴期间,磁层能量会以焦耳加热的形式沉降到热层-电离层系统,高纬热层大气密度受热膨胀上升,并在中性风的作用下中低纬大气密度出现相应地增大,最终形成全球

性的大气密度扰动过程。研究表明,焦耳加热在高纬地区的注入受到高能粒子沉降的影响(Wang et al., 2024a)^[27],大气密度对于焦耳加热会出现明显的时空响应特征(Wang et al., 2020, 2021)^[28, 29],并进一步分析了2024年5月母亲节超强磁暴期间中性风对大气扰动传播的重要作用(Wang et al., 2025a)^[30]。此外,磁暴期间的焦耳加热还会进一步强化低热层一氧化氮冷却效应,形成“焦耳加热——NO 冷却——密度过冷却”的耦合机制,深刻影响全球大气密度扰动的时空演化规律(刘舒莳等, 2014)^[31]。

平均轨道根数以两行轨道根数(TLE)为代表,该类数据去除了地球非球形引力摄动的周期项影响,反应了卫星轨道的长期变化趋势,其中平均运动是卫星每天绕地运行的平均角速度。在没有制动的条件下,卫星轨道逐渐衰减,平均运动逐渐增加,可以反演出轨道处的大气密度。基于CHAMP和GRACE-A卫星数据的研究表明,TLE反演得到大气密度的整体平均误差小于5%,标准差小于8%,优于经验大气密度模型NRLMSISE-00、JB2008和MSIS2.0(任廷领等, 2025)^[32]。然而,TLE数据由于精度较差,通常只能将时间分辨率设置为2天以上才能保证反演密度的精度(Ren et al., 2022)^[33],另一种方法是通过精密星历反演大气密度,精度更高,在400km左右的卫星轨道每天衰减量为几十米量级(Ren et al., 2018)^[34],因此可以反演出时间分辨率几十分钟量级的大气密度。任廷领(2023)^[35]基于加速度拟合算法实现了高精度的大气密度反演,其基本原理是采用最小二乘拟合法直接从少数几个连续的速度参量拟合卫星的瞬时加速度,然后利用高精度轨道力学模型(High-Precision Orbit Propagator, HPOP)对地球引力、三体摄动、太阳光压和潮汐摄动等加速度量进行模拟,从而得出大气阻力引起的加速度大小,最终利用阻力加速度与大气密度之间的关系式反演大气密度。结果表明,加速度拟合反演密度的平均误差和标准差均处在较低水平,且明显小于常用的NRLMSISE-00模式。

目前已有的大气密度模型准确性较差,平均误差在15%—20%,而在地磁暴期间,模型误差会进一步增大,有时甚至可以达到100%以上(王昕等, 2020;李颢等, 2021)^[36, 37]。例如星链卫星在地磁暴空间扰动时期的坠毁(罗冰显等, 2022)^[38],以及澳大利亚Binar-2/3/3系列卫星过早坠入大气层,都是大气密度急剧增大超过预期值所导致的(Wang et al., 2025b)^[39]。因此,在空间站等工程应用中,需要对现有模型进行修正和改进,提高大气密度模型的准确性。Wang et al. (2022)^[40]在大气密度和焦耳加热变化关系研究基础上,加入地磁Dst指数和AE指数与大气密度变化的特征分析,建立了综合的地磁暴大气密度修正函数,验证结果显示修正后的大气密度相对误差(MRE)由40%下降至10%。此外,刘卫等(2023a)^[41],李颢(2020)^[42]以Jacchia 1970模型为基础模型,根据温度垂直剖面计算方法,对拐点和外逸层这两个边界温度计算函数按经纬度球谐系数展开,将条件方程泰勒展开线性化迭代求解得到修正系数,构建了热层大气密度动态修正模型系统,结果显示修正后模型的预报相对误差在磁暴期平均下降33.8%,在磁静期平均下降9.1%。刘卫等(2023b)^[43]还基于俄罗斯的GOST模型,发展了面向磁暴期的DAM(The Disturbed Atmospheric Model)大气密度修正模型,结果表明,DAM模型较GOST、MSIS00经验模型均有明显提升。中国科技大学雷久侯研究团对长期致力于大气密度的准确预报,例如基于智能优化粒子滤波法构建热层大气的长期预报模型(Ren & Lei, 2022)^[44]。中国科学院地质与地球物理研究所刘立波团队通过深度学习,提升从观测数据中提取热层大气密度变化的能力(Li et al., 2023)^[45]。

对于低轨卫星而言,影响轨道预报精度的因素包括:大气密度、阻尼系数、轨道数据精度、面质比。其中大气密度是轨道预报误差的主要来源,但阻尼系数等对轨道预报的影响同样至关重要。针对以上四种因素进行了深入研究,对各因素对空间站轨道预报的影响进行了量化分析,通过大量实验统计,在最优定轨弧长、精细化空间环境指数预报和大气模型修正等方面均进行了优化,使空间站24小时轨道预报误差降低10%以上。另外,Wang

et al. (2024b)^[46]提出了一种利用受地磁活动和高度影响的热层大气温度和密度来确定阻尼系数的新方法，并首次通过空间中心和小卫星院共同研制的“轨道大气密度探测实验卫星”的数据来计算和分析阻尼系数在磁暴期间的响应。

3.3.2 空间环境指数预报

地磁指数作为太阳风注入大气的能量表征，典型表征参数主要有 Kp 指数、Ap 指数、Dst 指数等。王昕雨 et al. (2024)^[47]构建了神经网络 3 天 Kp 指数预报模型，并使用人工智能(AI)可解释性算法定量化各因子贡献。Wang et al. (2025)^[48]从太阳源头入手，综合日冕磁场结构和冕洞形态特征参数，构建了地磁预报 AI 模型，模型在提前 3 日预报的相关系数较国际领先的深度学习 Kp 指数模型提升了 58%。Shi et al (2021, 2022)^[49, 50]针对 1996 年以来的 215 个 CME 事件，建立了包含 CMEs 特征、源区位置坐标和太阳风参数等 18 个物理特征量的综合关联列表，设计了基于推荐算法来预测 CMEs 是否会达到地球以及到达时间的模型，平均绝对误差和均方根误差分别为 11.78 小时和 13.75 小时，达到了 CME Scoreboard 上发布的其它模型的平均水平。制定了国家标准 GB/T 41214-2022/ISO 16698:2019《空间环境（自然和人工）地磁活动的预报方法》^[51]。

2.4 自主监测数据应用

随着我国探测手段发展和探测范围拓展，子午工程从太阳爆发到行星际传播的全链条监测，ASO-S 近实时的太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射观测，空间站大气密度多向探测、多通道高能粒子、等离子体原位成像探测和实时处理，中国科学院空间环境监测网 21 个台站 47 台设备的稳定业务化运行和数据收集，为我们基于自主监测数据的预报方法、预报模型和预报产品制定提供了数据基础，在空间站空间环境保障中得到了应用。

自主探测数据在业务预报中发挥着重要作用，联合子午工程和中科网各地磁台站监测数据，反演得到地磁活动 K 指数具有较高可靠性^[52]，其中 2014-2018 年漠河、北京、廊坊、富克、三亚台站与国际 Kp 指数相关系数分别为 0.89, 0.87, 0.76, 0.70, 0.76，五个台站平均相关系数达 0.80（图 7）。同时，反演得到的 K 指数可较好地反映太阳爆发活动对地磁场的影响，用于地磁暴预警信息发布（图 8）。利用多台站电离层数据，解算获得全球 TEC 地图。研制完成了“L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜”，实现了 L&S 波段多频点射电流量数据的实时获取（图 9, 图 10），其中自主 F10.7 指数与国际数据相关系数达到 0.95（图 11）。同时，加强了天基自主探测数据的预报应用。ASO-S 卫星具有对太阳磁场、耀斑、日冕物质抛射（CME）的同时监测能力，可实现太阳活动区表面演化、太阳耀斑爆发过程、日冕物质抛射爆发的监测，为基于太阳爆发活动监测的对地效应预报提供数据基础^[53, 54]。空间站监测的太阳辐射和高能粒子探测为发展基于自主数据的太阳 X 射线耀斑和太阳质子事件预警技术提供基础^[55]，空间站的大气密度原位探测数据，在分析爆发活动期间空间站轨道大气密度特征变化、评估空间站定轨和轨道预报精度发挥了重要作用^[56]。

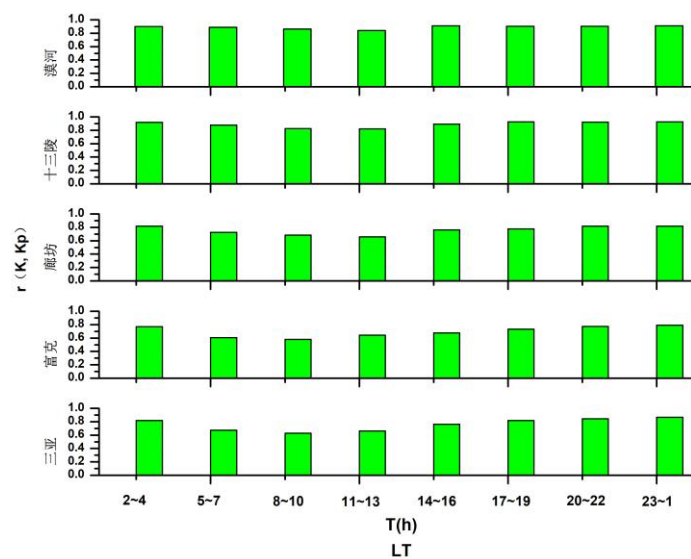


图 7 基于我国地磁台站数据反演的 2014–2018 年地磁 K 指数与国际 Kp 指数的相关系数

Fig.7 Correlation coefficients between the geomagnetic K-index inverted from Chinese geomagnetic station data and the international Kp-index for 2014–2018



图 8 基于我国地磁台站数据反演的 2024 年 5 月 10–14 日的地磁 K 指数（世界时）

Fig.8 Geomagnetic K-index (Universal Time) inverted from Chinese geomagnetic station data for 10–14 May 2024(UTC)

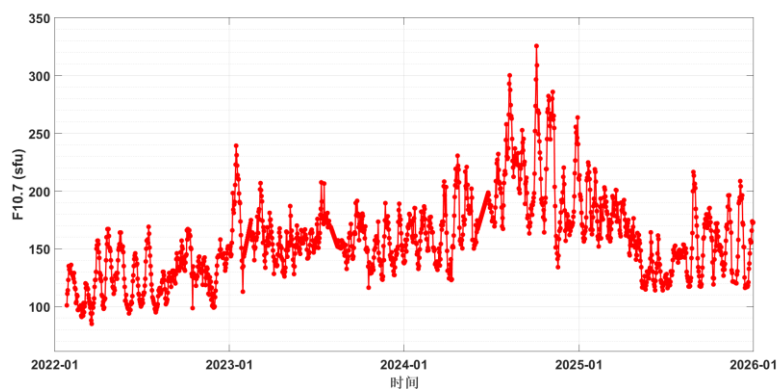


图 9 “L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜” S 波段（2840MHz）获取的 F10.7 指数

Fig.9 F10.7 index obtained in the S-band (2840 MHz) by the L&S-band Solar Radio Flux Precision Monitoring Telescope

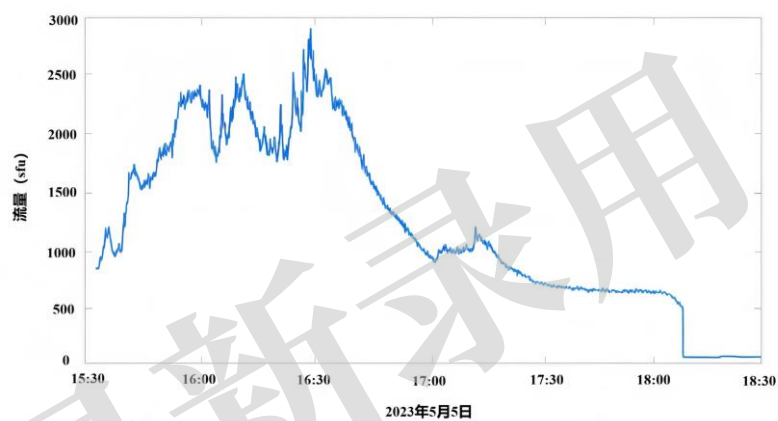


图 10 “L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜”获取的 2023 年 5 月 5 日 L 波段（1600MHz）频点太阳射电流量曲线

Fig.10 Solar radio flux curve at the L-band (1600 MHz) frequency channel observed by the L&S-band Solar Radio Flux Precision Monitoring Telescope on 5 May 2023

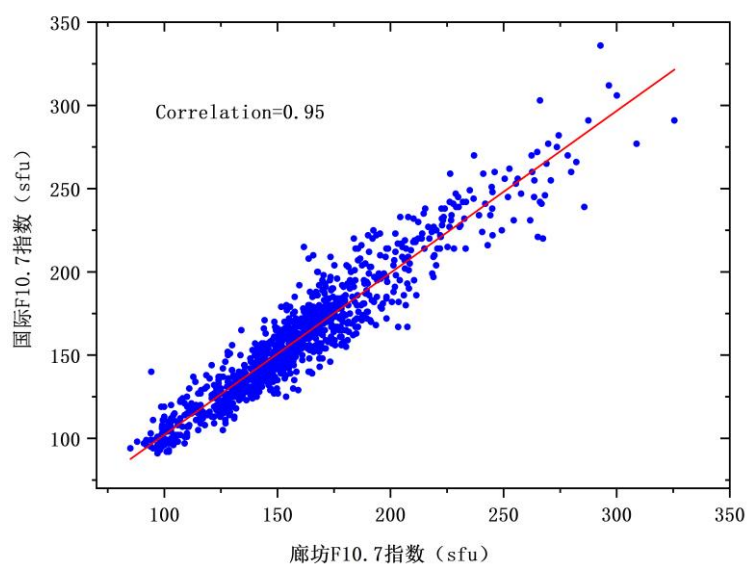


图 11 2022–2024 年廊坊 F10.7 指数与国际 F10.7 指数相关系数

Fig.11 Correlation coefficients between Langfang F10.7 index and the international F10.7 index for 2022–2024

3 未来展望

我国空间站未来 10–15 年的长期在轨运行，需持续开展空间环境预报技术研究，建立准确的太阳爆发活动、辐射环境和大气环境工程模型，提供高精度、智能化的各类预报产品，旨在为空间站长期在轨运营、航天员安全提供更可靠的预报保障。

由于未能充分掌握太阳爆发活动的机理，目前太阳爆发活动预报还存在预报精度低、虚报率高等问题。未来太阳爆发活动预报将围绕提升预报的精细度、确定性来开展，不仅能预报耀斑，还能同时预测日冕物质抛射（CME）和太阳高能粒子事件的发生，还需预测事件强度（如 CME 速度、粒子通量峰值）、能量谱、三维传播方向等关键物理参数，为评估其地球空间影响提供输入，同时预报必须兼具高准确性与低误报率。在太阳爆发活动预报技术手段上，将利用人工智能手段，将多源数据与预报模型深度融合，并注重与物理机制的结合，实现太阳爆发预报准确预报。

空间站辐射环境预报主要存在的问题是现有的辐射带模型，如 AP8/AP9 模型等，都是静态平均的经验模型，无法反映辐射带中长期的变化，尤其是在 400km 左右的低高度上，已有的经验模型存在低估或高估辐射带通量水平的情况。未来除了在充分的数据积累条件下，改进辐射带经验模型，还需要基于辐射带与银河宇宙线、高层大气、地磁场等环境的相互作用机理，建立监测数据驱动的辐射带数值预报模型，以及时准确的反映辐射带通量的动态变化情况。其次，太阳质子事件预报的准确性还有待提高，这依赖于更先进的太阳爆发观测，以及更准确的激波和粒子加速预报模型。

目前工程应用主要基于国际公开发布的参考大气模型，模型存在参数更新时效低、颗粒度粗、无法自主可控等问题，且实时高精度模型无法获取，亟需建立我国自主的高精度大气密度模型，进一步改进和提高密度模型，进而提升轨道预报精度。基于卫星大气密度探测技术的快速发展，利用人工智能与数值模拟技术的深度融合，未来大气密度预报技术有望获得突破，能够实现高精度的低轨热层大气密度动态预报，提升地磁暴等剧烈空间天气事件期间的大气密度扰动预警能力，服务于空间站、巨型星座等低轨航天器的轨道规划、再入预警、卫星碰撞规避等任务。

参考文献

- [1] HUANG X, WANG H N, XU L, *et al.* Deep learning based solar flare forecasting Model. I. results for line-of-sight magnetograms[J]. *Astrophysical Journal*, 2018, **856**(1): 7
- [2] WANG J J, LIU S Q, AO X Z, *et al.* Parameters derived from the SDO/HMI vector magnetic field data: potential to improve machine-learning-based solar flare prediction models[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **884**(2): 175
- [3] WANG J J, ZHANG Y H, WEBBER S A H, *et al.* Solar flare predictive features derived from polarity inversion line masks in active regions using an unsupervised machine learning algorithm[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **892**(2): 140
- [4] HE Xinran, ZHONG Qiuzhen, CUI Yanmei, *et al.* Solar flare short-term forecast model based on long and short-term memory neural network[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 862-872 (何欣燃, 钟秋珍, 崔延美, 等. 基于长短期记忆神经网络的太阳耀斑短期预报[J]. *空间科学学报*, 2022, **42**(5): 862-872)
- [5] HE Xinran, ZHONG Qiuzhen, SHI Liqin, *et al.* Early warning method and Early warning system for solar flares: CN, 202110769908.9[P]. 2021-07-07 (何欣燃, 钟秋珍, 师立勤, 等. 一种针对太阳耀斑的预警方法

及预警系统: 中国, 202110769908.9[P]. 2021-07-07)

- [6] WANG J J, LUO B X, LIU S Q, *et al.* A strong-flare prediction model developed using a machine-learning algorithm based on the video data sets of the solar magnetic field of active regions[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, **269**(2): 54
- [7] LI M, CUI Y M, LUO B X, *et al.* Knowledge-informed deep neural networks for solar flare forecasting[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(8): e2021SW002985
- [8] LI M, CUI Y M, LUO B X, *et al.* Deep neural networks of solar flare forecasting for complex active regions[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1177550
- [9] DENG H, ZHONG Y T, CHEN H, *et al.* Two-stage hierarchical framework for solar flare prediction[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, **268**(2): 43
- [10] LIU S W, WANG J J, LI M, *et al.* A selective up-sampling method applied upon unbalanced data for flare prediction: potential to improve model performance[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1082694
- [11] LI Ming, CUI Yanmei, LUO Bingxian. Machine learning solar full disk flare operational forecasting[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 82-90 (李铭, 崔延美, 罗冰显. 全日面机器学习耀斑业务预报[J]. *空间科学学报*, 2025, **45**(1): 82-90)
- [12] LI M, CUI Y M, LUO B X, *et al.* Operational solar flare ensemble forecasting model for full-disk active regions[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2026, **283**(2): 58. DOI: 10.3847/1538-4365/ae4741
- [13] SHAO M F, WANG H, LI Y Y, *et al.* JW-Flare: accurate solar flare forecasting method based on multimodal large language models[OL]. arXiv preprint arXiv: 2511.08970, 2025.
- [14] WANG J J, LIANG P Y, WANG T Y, *et al.* Large model driven solar activity AI forecaster: a scalable dual data-model framework[OL]. arXiv preprint arXiv: 2508.06892, 2025.
- [15] WANG J J, AO X Z, WANG Y M, *et al.* An operational solar wind prediction system transitioning fundamental science to operations[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, **8**: A39
- [16] WANG J J, SHI Y R, LUO B X, *et al.* Upstream solar wind prediction up to mars by an operational solar wind prediction system[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(1): e2022SW003281
- [17] ZHONG Q Z, WANG J J, MENG X J, *et al.* Prediction model for solar energetic proton events: analysis and verification[J]. *Space Weather*, 2019, **17**(5): 709-726. DOI: 10.1029/2018SW001915
- [18] DU Chenxi, AO Xianzhi, LUO Bingxian, *et al.* Ensemble numerical simulations of a realistic SEP event under conditions of various inner boundaries and the application in SEP forecast[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, **38**(3): 248-255 (杜晨曦, 敖先志, 罗冰显, 等. 不同内边界条件下 SEP 事件实例的集合数值模拟及其在 SEP 事件预报中的应用[J]. *航天器环境工程*, 2021, **38**(3): 248-255)
- [19] DU C X, AO X Z, LUO B X, *et al.* Ensemble numerical simulations of realistic SEP events and the inspiration for space weather awareness[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, **22**(2): 025003
- [20] ZHONG Qiuzhen, CHEN Xueqing, CHEN Dong, *et al.* Study on variation law of geomagnetic cutoff rigidities of high energetic particles in manned space station orbit[J]. *Manned Spaceflight*, 2025, **31**(3): 320-326 (钟秋珍, 陈雪晴, 陈东, 等. 载人空间站轨道高能粒子地磁截止刚度变化规律研究[J]. *载人航天*, 2025, **31**(3): 320-326)
- [21] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of

- China. GB/T 41206-2021 Space environment (natural and artificial)—cosmic ray and solar energetic particle penetration inward the magnetosphere—method of determination of the effective vertical cut-off rigidity[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 41206-2021 空间环境(自然和人工)宇宙线和太阳能量粒子穿入磁层 有效垂直地磁截止刚度的确定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021)
- [22] CHANG Zheng, WANG Yongmei, TIAN Tian, *et al.* Modeling technology of radiation belt in LEO based on data gridding methods[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **41**(12): 2288-2295. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0799 (常峥, 王咏梅, 田天, 等. 基于数据网格化方法的低轨辐射带建模技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, **41**(12): 2288-2295. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0799)
- [23] LIN R L, ZHANG J C, ZHANG X X, *et al.* Long - term variations of >16 - MeV proton fluxes: measurements from NOAA POES and EUMETSAT MetOp satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): e2019JA027635. DOI: 10.1029/2019JA027635
- [24] LUO X, POTGIETER M S, BINDI V, *et al.* A numerical study of cosmic proton modulation using AMS-02 observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **878**(1): 6. DOI: 10.3847/1538-4357/ab1b2a
- [25] SONG X J, LUO X, POTGIETER M S, *et al.* A numerical study of the solar modulation of galactic protons and helium from 2006 to 2017[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **257**(2): 48. DOI: 10.3847/1538-4365/AC281C
- [26] CHEN X M, XU S Y, SONG X J, *et al.* Astronaut radiation dose calculation with a new galactic cosmic ray model and the AMS-02 data[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(4): e2022SW003285. DOI: 10.1029/2022SW003285
- [27] WANG X, CAI L, AIKIO A, *et al.* Ionospheric conductances due to electron and ion precipitations: a comparison between EISCAT and DMSP estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(2): e2023JA032354
- [28] WANG X, MIAO J, AA E, *et al.* Statistical analysis of Joule heating and thermosphere response during geomagnetic storms of different magnitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA027966
- [29] WANG X, MIAO J, XIAN L, *et al.* Latitudinal impacts of joule heating on the high-latitude thermospheric density enhancement during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(7): e2020JA028747
- [30] WANG X, AA E, CHEN Y H, *et al.* Midlatitude neutral wind response during the mother's day super - intense geomagnetic storm in 2024 using observations from the Chinese meridian project[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(4): e2024JA033574
- [31] LIU Shushi, GONG Jiancun, LIU Siqing, *et al.* Influence of nitric oxide cooling rates on thermospheric density during a succession of geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(6): 1700-1708. DOI: 10.6038/cjg20140602 (刘舒蒨, 龚建村, 刘四清, 等. NO 冷却率在连续磁暴中对热层密度的影响[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(6): 1700-1708. DOI: 10.6038/cjg20140602)
- [32] REN Tingling, LUO Bingxian, MIAO Juan, *et al.* Accuracy assessment of the TLE-derived orbital atmospheric densities[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(3): 717-728. DOI: 10.11728/cjss2025.03.2024-0060

- (任廷领, 罗冰显, 苗娟, 等. TLE 轨道反演大气密度精度评估[J]. 空间科学学报, 2025, **45**(3): 717-728. DOI: 10.11728/cjss2025.03.2024-0060)
- [33] REN T L, LIU S Q, MIAO J, *et al.* Effects of geomagnetic storms on the accuracy of orbit-derived atmospheric density measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(10): 2818-2829. DOI: 10.1016/J.ASR.2022.09.036
- [34] REN T L, MIAO J, LIU S Q. Atmospheric density determination using high-accuracy satellite GPS data[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(2): 204-211. DOI: 10.1007/s11431-016-9096-6
- [35] REN Tingling. Thermospheric density inversion and model correction research[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023 (任廷领. 热层大气密度反演与模型修正研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023)
- [36] WANG Xin, MIAO Juan, LIU Siqing, *et al.* Characteristics analysis of thermospheric density response during the different intensity of geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 28-41 (王昕, 苗娟, 刘四清, 等. 不同强度磁暴期间热层大气密度响应特征分析[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(1): 28-41)
- [37] LI Xie, MAN Haijun, LIU Shushi, *et al.* Accuracy assessment of empirical density models through observed densities and orbit data[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, **27**(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5825.2021.01.001 (李颢, 满海钧, 刘舒蔚, 等. 基于航天器探测密度与轨道数据的密度模式精度评估[J]. 载人航天, 2021, **27**(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5825.2021.01.001)
- [38] LUO Bingxian, WANG Ronglan, LIU Wei, *et al.* Space environment analysis of the Starlink satellite destruction event caused by geomagnetic storm[J]. *Space International*, 2022(5): 35-39 (罗冰显, 王荣兰, 刘卫, 等. “星链”卫星毁于地磁暴事件空间环境分析[J]. 国际太空, 2022(5): 35-39)
- [39] WANG X, WANG R L, WANG K P, *et al.* Premature reentry of the Binar CubeSats due to underestimation of solar and geomagnetic activities and its implication for importance of medium - and long - term space weather forecasts[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(12): e2025SW004619
- [40] WANG X, MIAO J, LU X, *et al.* Using temporal relationship of thermospheric density with geomagnetic activity indices and Joule heating as calibration for NRLMSISE-00 during geomagnetic storms[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(4): e2021SW003017
- [41] LIU Wei, LUO Bingxian, GONG Jiancun, *et al.* Study on the model for dynamic correction of thermospheric density[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2023, **40**(3): 213-219 (刘卫, 罗冰显, 龚建村, 等. 热层大气密度动态修正模型研究[J]. 航天器环境工程, 2023, **40**(3): 213-219)
- [42] LI Xie. The Processing of In-Situ Thermospheric Density Observations and Empirical Density Model Calibrations[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020 (李颢. 星载原位大气密度探测数据处理及经验密度模式修正[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020)
- [43] LIU Wei, LUO Bingxian, GONG Jiancun, *et al.* Construction and verification of DAM model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 475-484. DOI: 10.11728/cjss2023.03.2023-0007 (刘卫, 罗冰显, 龚建村, 等. DAM 大气模型构建与验证[J]. 空间科学学报, 2023, **43**(3): 475-484. DOI: 10.11728/cjss2023.03.2023-0007)
- [44] REN D X, LEI J H. A long-range forecasting model for the thermosphere based on the intelligent optimized particle filtering[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, **65**(1): 75-86. DOI: 10.1007/S11430-021-9847-9
- [45] LI W B, LIU L B, CHEN Y D, *et al.* Improving the extraction ability of thermospheric mass density variations

- from observational data by deep learning[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(7): e2022SW003376. DOI: 10.1029/2022SW003376
- [46] WANG X, REN T L, WANG R L, *et al.* Estimates of spherical satellite drag coefficients in the Upper thermosphere during different geomagnetic conditions[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(11): e2024SW003974
- [47] WANG Tingyu, LUO Bingxian, CHEN Yanhong, *et al.* Modeling next 3-day Kp index forecasting with neural networks and exploring the application of explainable AI[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 437-445. DOI: 10.11728/cjss2024.03.2023-0107 (王昕雨, 罗冰显, 陈艳红, 等. 基于神经网络的未来 3 天 Kp 指数预报建模与可解释 AI 应用[J]. 空间科学学报, 2024, **44**(3): 437-445. DOI: 10.11728/cjss2024.03.2023-0107)
- [48] WANG T Y, LUO B X, WANG J J, *et al.* Forecasting of the geomagnetic activity for the next 3 days utilizing neural networks based on parameters related to large-scale structures of the solar corona[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(2): e2024SW004090. DOI: 10.1029/2024SW004090
- [49] SHI Y R, CHEN Y H, LIU S Q, *et al.* Predicting the CME arrival time based on the recommendation algorithm[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(8): 190
- [50] SHI Y R, WANG J J, CHEN Y H, *et al.* Impacts of CMEs on earth based on logistic regression and recommendation algorithm[J]. *Space: Science & Technology*, 2022, **2022**: 9852185
- [51] State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 41214-2021 Space environment (natural and artificial)—methods for estimation of future geomagnetic activity[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员. GB/T 41214-2021 空间环境(自然和人工)地磁活动的预报方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021)
- [52] WANG Geng, LUO Bingxian, LIU Siqing, *et al.* An improved algorithm for nowcast of Kp index[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(2): 153-166 (王庚, 罗冰显, 刘四清, 等. 一种改进的 Kp 指数现报模式[J]. 空间科学学报, 2016, **36**(2): 153-166)
- [53] JIANG X K, ZHANG Z, HU Y M, *et al.* X-ray beam experiment for the Hard X-ray Imager onboard ASO-S[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, **1053**: 168379. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168379
- [54] XIA Y H, SU Y, LIU H, *et al.* A new solar hard X-ray image reconstruction algorithm for ASO-S/HXI based on deep learning[J]. *Solar Physics*, 2024, **299**(11): 158. DOI: 10.1007/s11207-024-02399-4
- [55] WANG Chunqin, CHANG Zheng, SHEN Guohong, *et al.* Observation of extravehicular radiation dose on China Space Station[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, **68**(5): 1579-1586. DOI: 10.6038/cjg2024S0213 (王春琴, 常峥, 沈国红, 等. 2025. 中国空间站舱外辐射剂量实测结果[J]. 地球物理学报, 2025, **68**(5): 1579-1586. DOI: 10.6038/cjg2024S0213)
- [56] LI Y P, SUN Y Q, ZHANG X G, *et al.* Thermosphere joint observations by TM-1 constellations and Swarm-B during the April 2023 geomagnetic storm[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2024, **8**(2): 307-316. DOI: 10.26464/epp2024002